

## Wasserstromkreis

nach Prof. Dieter Plappert, Freiburg i.Br.

Best.- Nr. CL80751

### 1. Didaktische Vorbemerkungen

Wasserströme werden oft zur Veranschaulichung für die zur Beschreibung von elektrischen Stromkreisen benötigten Begriffe herangezogen, ohne dass die Schülerinnen und Schüler eigene Vorerfahrungen von geschlossenen Wasserstromkreisen haben, in denen die „Inkompressibilität“ des Wassers die entscheidende Rolle spielt. Mit dem Wasserstromkreismodell kann das

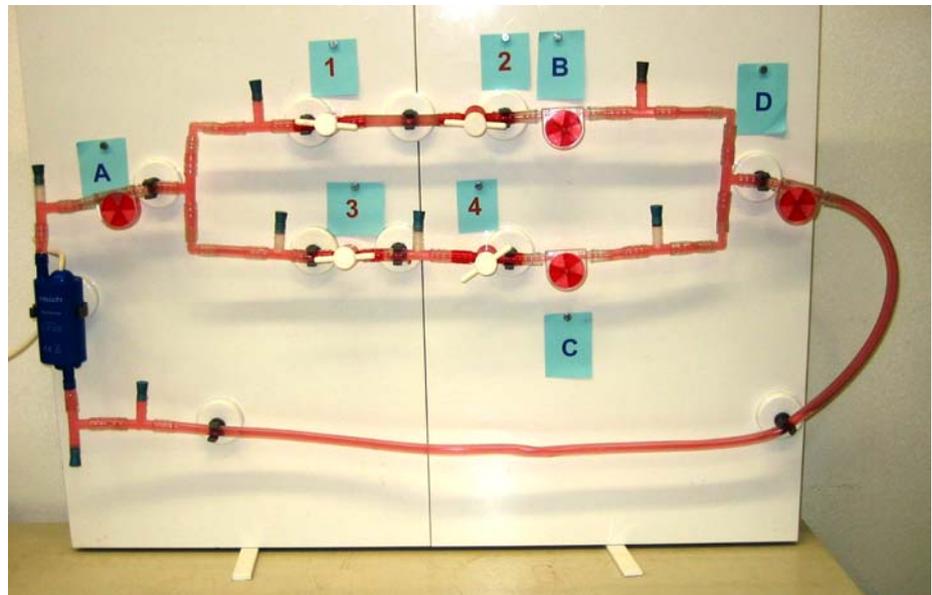


Abb. 1: Wasserstromkreis ohne eingebaute Manometerröhren

Verhalten eines solchen „Wasserstromkreises“ im Unterricht untersucht werden. Dabei erscheinen z.B. beim unverzweigten Stromkreis die Konstanz der Stromstärke und beim verzweigten Stromkreis die Knotenregel als Selbstverständlichkeiten. Besonders eindrücklich kann auch demonstriert werden, dass sich der Wasserstromkreis als System verhält, d. h. dass er auf jede **lokale** Veränderung an irgendeiner Stelle des Stromkreises als **Ganzheit** reagiert.

Der für solche Überlegungen benötigte zusätzliche Zeitaufwand kann zum einen damit gerechtfertigt werden, dass sich die anschaulich eingeführten Begriffen „Stromstärke“, „Spannung (Druckdifferenz)“ und „Widerstand“ als so tragfähig erweisen, dass sich später in anderen Gebieten der Physik, insbesondere in der Elektrizitätslehre, Zeit gewinnen lässt und zum anderen, dass Hydraulik und Pneumatik in unserer technischen Umwelt eine immer größere Rolle spielen. In [1] wird die physikalische Grundlage der hier verwendeten Analogie ausführlich dargestellt und in [2] wird skizziert, wie mithilfe von „Wasseranalogien“ die zentralen physikalischen Konzepte der Elektrizitätslehre eingeführt werden können.

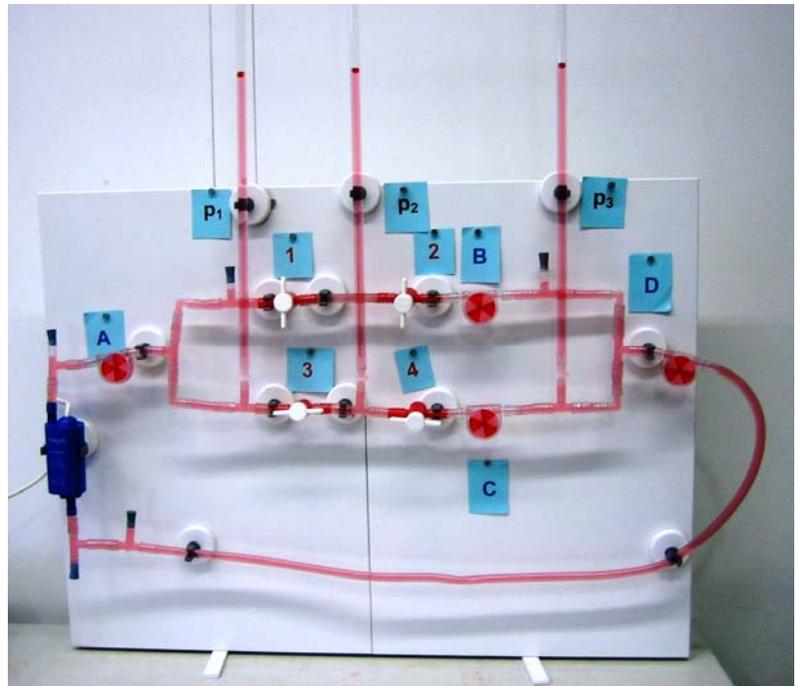


Abb. 2: Wasserstromkreis mit eingebauten Manometerröhren

Die hier beschriebenen Versuche sind in erster Linie als „qualitative“ Versuche gedacht. Quantitative Messungen können zum einen beim Druck und bei Druckdifferenzen mithilfe eines digitalen Manometers (CL80720) und bei der Wasserstromstärke in gewissen Grenzen mit einem „Wasserstromstärkemesser“ durchgeführt werden: an einem „Wasserrad“ kann eine (Gabel)-Lichtschranke angebracht werden, an die ein Frequenzmesser angeschlossen ist. Dieses „Strommessgerät“ kann mit Becherglas und Stoppuhr geeicht werden.

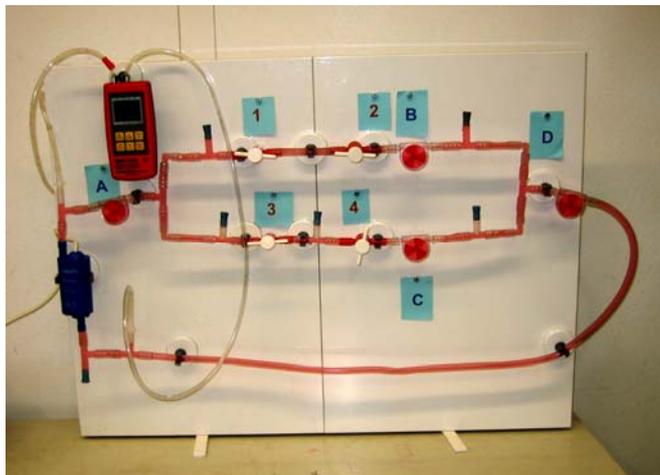


Abb. 3: Wasserstromkreis mit eingebautem digitalen Manometer

## 2. Aufbau

Der Wasserstromkreis kann mit oder ohne Manometerröhren betrieben werden. Zur Druckmessung können im gefüllten Zustand an verschiedenen Stellen nachträglich Manometerröhren eingebaut oder ein digitales Manometer angeschlossen werden. Das Wasser kann je nach der Stellung der „Widerstandshähne“ 1 bis 4 durch den oberen, den unteren oder durch beide Zweige fließen. Die „Wasserrädchen“ A bis D dienen als Indikatoren für die „Wasserstromstärke“ an der jeweiligen Stelle des Schlauchs. Die Manometerröhren zeigen, wenn sie oben geöffnet sind, den an den jeweiligen Stellen herrschenden Wasserdruck an. Durch das Vergleichen von zwei benachbarten Manometerröhren können Druckdifferenzen beobachtet werden.

Die Pumpe kann an jedes Gleichspannungsnetzgerät ( $U_{\max} = 12 \text{ V}$ ) angeschlossen werden. Die Spannung sollte immer von 0 V aus langsam gesteigert werden, da bei geöffneten Manometerröhren bei zu großen Druckunterschieden die Manometerröhren überlaufen können oder, wenn der Wasserspiegel zu stark sinkt (Abb. 4), Luft in den Wasserstrom hereinströmen kann. Als gut geeignet hat sich eine Spannung von 3-4 V erwiesen.

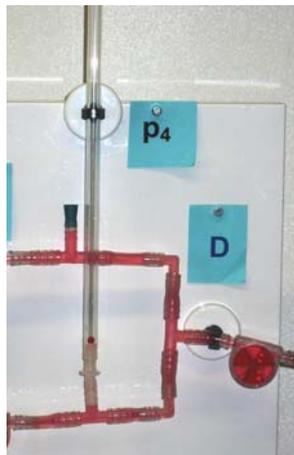


Abb. 4: Luft tritt ein, wenn der Wasserspiegel zu tief sinkt!

### 3. Füllen und Leeren des Wasserstromkreises

Um das Wasser besser sichtbar zu machen, kann etwa 300 ml Wasser mit Lebensmittelfarbe eingefärbt werden und in eine Spritzflasche gefüllt werden. Zum Befüllen des Wasserstromkreises werden drei Manometerröhren auf T-Stücke gesteckt und alle Hähne geöffnet (Abb. 6). Zunächst wird Wasser bei dem T-Stück oberhalb der Pumpe eingefüllt (Abb. 5). Dann wird dieses T-Stück verschlossen und der Wasserstromkreis über das untere Manometerrohr vollständig gefüllt (Abb. 6). Die Luft entweicht dabei über die beiden anderen Manometerröhren. In der Regel befinden sich dann im oberen Zweig des Wasserstromkreises noch einige Luftblasen. Diese können zu den oberen Manometerröhren „geführt“ werden, indem die Pumpe bei sehr kleiner Spannung an und ausgeschaltet wird. Sinnvoll kann es hierbei sein die Hähne des unteren Zweiges zu schießen. Zum Leeren des Wasserstromkreises wird das T-Stück unterhalb der Pumpe geöffnet.

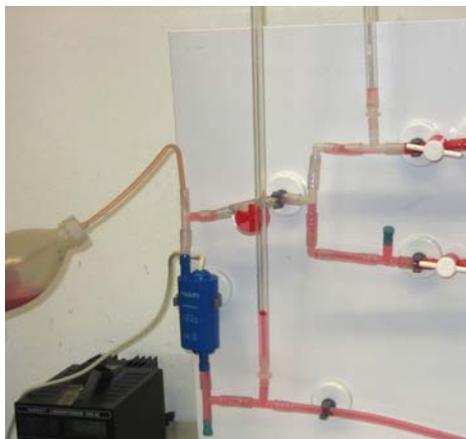


Abb. 5: Zunächst wird Wasser oberhalb der Pumpe eingefüllt...

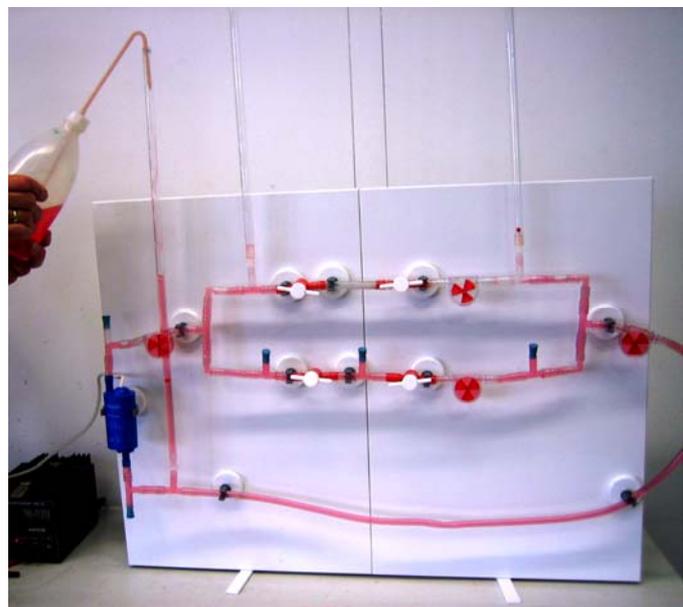


Abb. 6: ... dann durch das untere Manometerrohr

## 4. Das Aufstecken und Entfernen der Manometerröhren bei gefülltem Stromkreis

Die Manometerröhren können beim gefüllten Wasserstromkreis aufgesteckt und entfernt werden. Wird die folgende Grundregel „**es darf nie mehr als ein T-Stück gleichzeitig geöffnet, d.h., es darf nie mehr als ein Stopfen gleichzeitig entfernt sein!**“ konsequent beachtet, dann treten hierbei höchstens ein paar Wassertropfen aus, die leicht von einem Papierhandtuch aufgenommen werden können. Vor dem Aufstecken eines Manometerrohres, sollte es gefüllt werden (Abb. 8). Dazu kann Wasser aus einem Glas angesaugt werden, danach ist das untere Ende mit dem Daumen so lange zu verschließen, bis die Manometerröhre oben durch einen Stopfen verschlossen ist.

Wird die oben beschriebene Grundregel beachtet, dann können auch die Schläuche eines digitalen Manometers an den unterschiedlichsten Stellen des Stromkreises angeschlossen werden. Hierbei ist zu beachten, dass bei Messung der Druckdifferenz vor der ersten Messung der Nullpunkt des Manometers bei ausgeschalteter Pumpe eingestellt werden muss („Tara“-Taste).

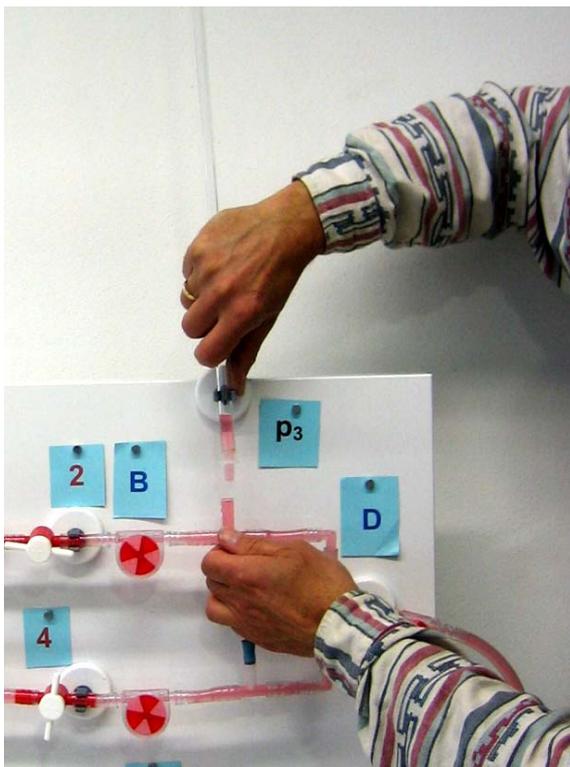


Abb. 7: Es darf nie mehr als ein T-Stück geöffnet sein

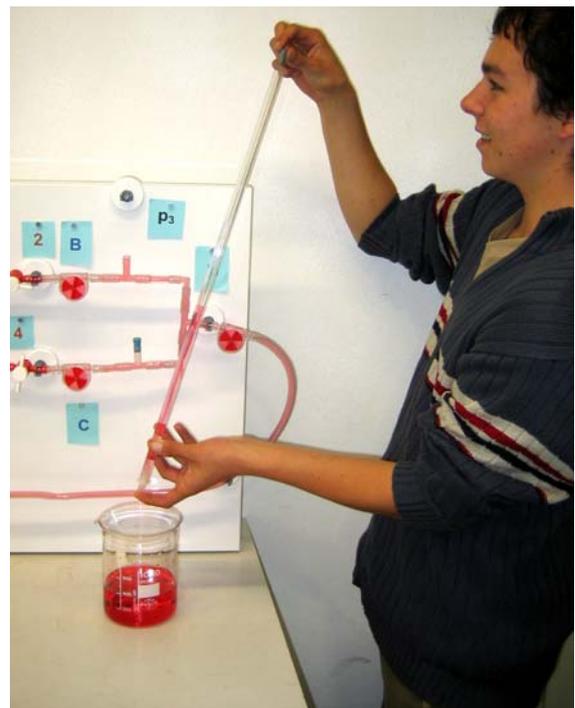


Abb. 8: Wasser wurde angesaugt und dann das Rohr oben verschlossen.

## 5. Unterrichtliche Voraussetzungen für den Einsatz des Wasserstromkreises

Vor dem Experimentieren mit dem Wasserstromkreis sollten die folgenden Versuche bzw. Begriffe erarbeitet worden sein [2]:

- die Einführung der „Wasserstromstärke  $I_{\text{Wasser}}$ “ mit der entsprechenden Maßeinheit l/s, z.B. mithilfe von Stoppuhr und Becherglas,
- das „Wasserrädchen“ als Indikator für die Stärke des Wasserstroms,
- der Druck  $p$  mit den entsprechenden Maßeinheiten,
- dass der Druck in Flüssigkeiten nur von der Höhe des Wasserspiegels abhängt,
- dass in „Kommunizierenden Röhren“ unabhängig von ihrer Bauform der Wasserspiegel in den miteinander verbundenen Röhren gleich hoch steht,
- dass die Druckdifferenz  $\Delta p$  als Antrieb von Flüssigkeits- und Gasströmen wirkt,
- dass je dünner und je länger ein Schlauch ist, desto größer sein Strömungswiderstand ist,
- das „Strom-Antrieb-Widerstand-Konzept“,
- dass Wasser im Gegensatz zu Gasen inkompressibel ist (Kolbenprober, Arztspritze).

## 6. Der Wasserstromkreis als System

**Leitfrage 1: Welches Wasserrädchen dreht sich beim Einschalten der Pumpe zu erst?**

**Versuchsaufbau und -durchführung:** Unverzweigter Stromkreis (untere Hähne geschlossen), ohne Manometerröhren. Die Pumpe wurde vor dem Unterricht so eingestellt, dass die Rädchen sich nach dem Einschalten sichtbar drehen. *Bevor* die Pumpe in Betrieb gesetzt wird, wird mit den Schülerinnen und Schülern darüber diskutiert, in welcher Reihenfolge sich beim Einschalten die Wasserrädchen zu drehen beginnen. Es zeigt sich, dass trotz der Vorversuche viele Schülerinnen und Schüler noch keine stabile „**Kontinuitätsvorstellung**“ gebildet haben. Viele denken, dass sich das Rad A zuerst zu drehen beginnt, da es der Pumpe am nächsten liegt. Ein kurzes Unterrichtsgespräch genügt dann aber, dass allen Schülerinnen und Schülern verständlich wird, dass wegen der Inkompressibilität das Wasser in einem unverzweigten, geschlossenen Stromkreis überall gleichzeitig zu strömen beginnen muss.

**Ergebnis:** Das Wasser des Stromkreises beginnt gleichzeitig überall zu strömen. **Der Stromkreis reagiert auf lokale Störungen als Ganzheit.**

**Leitfrage 2: Was passiert, wenn der Schlauch an einer Stelle zusammen gedrückt wird?**

**Versuchsaufbau und -durchführung:** Unverzweigter Stromkreis (untere Hähne geschlossen), ohne Manometerröhren. Mit der Hand bzw. mit einer kleinen Schraubzwinde wird der Schlauch an irgendeiner Stelle des unverzweigten Stromkreises zusammengedrückt. Überall im Stromkreis nimmt die Stärke des Wasserstroms ab. Das Wasser staut sich an keiner Stelle.

**Ergebnis: Der Stromkreis reagiert auf lokale Störungen als Ganzheit.**

**Bemerkung:** An dieser Stelle im Unterricht wird zunächst vernachlässigt, dass die „Druckwelle“ eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit hat.

## 7. Die Knotenregel

**Leitfrage 1: Was passiert im verzweigten Stromkreis, wenn alle Hähne vollständig geöffnet sind?**

**Versuchsaufbau und -durchführung:** Alle Hähne sind vollständig geöffnet, Stromkreis ohne Manometerröhren. Rad A und D zeigen dieselbe Wasserstromstärke an, Rad B und C drehen sich deutlich langsamer, aber gleich schnell.

**Ergebnis:** Es ist sofort verständlich, dass die Stärke des Wasserstroms vor der Verzweigung genau so groß ist wie die Summe der Wasserstromstärken in den beiden Zweigen. In der Fachsprache werden die Verzweigungsstellen „Knoten“ genannt. Die **Knotenregel** kann formuliert werden.

**Leitfrage2: Was passiert im verzweigten Stromkreis, wenn in einem Zweig ein Hahn langsam zuge dreht wird?**

**Versuchsaufbau und -durchführung:** Alle Hähne sind zunächst vollständig geöffnet, Stromkreis ohne Manometerröhren. Rad A und D zeigen dieselbe Wasserstromstärke an, Rad B und C drehen sich deutlich langsamer, aber gleich schnell. Wird nun z.B. Hahn 4 zuge dreht, so dreht sich Rad C langsamer und Rad B entsprechend schneller.

**Ergebnis:** Die Knotenregel gilt weiterhin; in dem Zweig mit dem kleineren Strömungswiderstand wird die Stromstärke größer, in dem mit dem größeren Widerstand entsprechend kleiner, so dass die Gesamtstromstärke weiterhin überall gleich ist.

## 8. Der Druckverlauf im unverzweigten Stromkreis

**Leitfrage 1: Wie ändert sich der Druck innerhalb eines unverzweigten Wasserstromkreises?**

**Versuchsaufbau und -durchführung:** Hahn 1 und 2 geschlossen (unverzweigter Stromkreis), Hahn 3 und 4 vollständig geöffnet. Längs des Stromkreises sind verschiedene Manometerröhren eingebaut (Abb. 9 und 10).

**Ergebnis:** Der Druck nimmt längs des Stromkreises ab.

**Leitfrage 2: Wie ändert sich die Druckverteilung innerhalb des unverzweigten Wasserstromkreises, wenn der Strömungswiderstand an irgendeiner Stelle verändert wird?**

**Versuchsaufbau und -durchführung:** wie oben, nur dass jetzt die Stellung von Hahn 3 und 4 variiert werden.

**Ergebnis:** Die Druckdifferenz zwischen zwei Punkten des Stromkreises ist um so größten, je größer der Strömungswiderstand dazwischen ist. So ist z.B. in Abbildung 10 der Strömungswiderstand zwischen  $p_3$  und  $p_4$  größer als zwischen  $p_2$  und  $p_3$ . Je größer der Widerstand einzelner Teilstücken des Stromkreises ist, desto größer ist der Gesamtwiderstand des Stromkreises, d.h. „**Widerstände in Reihe addieren sich**“.

### **Bemerkungen:**

1. Mithilfe des digitalen Manometers können die Druckdifferenzen zwischen zwei Punkten als Zahlenwerte direkt ermittelt werden.
2. Ist den Schülerinnen und Schülern das „Energie-Träger-Konzept“ bekannt [2], dann kann darauf hingewiesen werden, dass der Druckabfall längs des Schlauches zeigt, wieviel Energie zwischen zwei Messpunkten vom Wasser abgeladen bzw. aufgeladen (bei der Pumpe) worden ist.

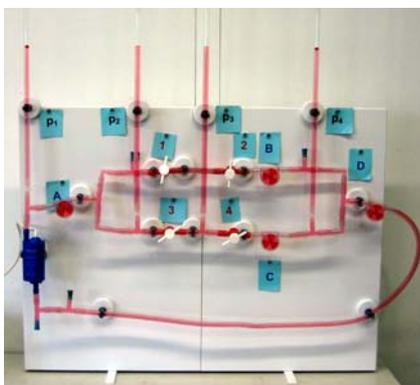


Abb. 9: Pumpe aus: Druckgleichgewicht

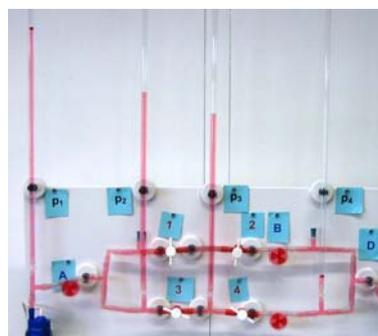


Abb. 10: Der Druckverlauf längs des Stromkreises wird sichtbar.

## 9. Der Gesamtwiderstand des verzweigten Stromkreises

**Leitfrage:** Hängt der Widerstand eines Stromkreises davon ab, ob er verzweigt ist oder nicht?

**Versuchsaufbau und -durchführung:** Stromkreis ohne Manometerrohren, Hahn 1 und 2 sind ganz und Hahn 3 und 4 teilweise geschlossen. Werden Hahn 1 und 2 nun teilweise geöffnet, so zeigen die Strömungsmesser A und D an, dass die Stromstärke im Stromkreis zunimmt, obwohl das Wasser durch „mehr Schläuche mit Widerstand“ hindurch strömt.

**Ergebnis:** Obwohl durch jede neue Verzweigung weitere Widerstände hinzukommen, nimmt der Gesamtwiderstand des Stromkreises mit jeder weiteren Verzweigung ab. Der Gesamtwiderstand eines Stromkreises wird also durch Parallelschaltung kleiner.

## 10. Es kommt nicht auf den Druck sondern auf die Druckdifferenz an

**Leitfrage:** Ändert sich am Strömungsverhalten eines Stromkreises etwas, wenn der Gesamtdruck im System vergrößert wird?

**Versuchsaufbau und -durchführung:**

Es ist ein Wasserstromkreis mit Manometerrohren aufgebaut. Die Pumpe treibt den Wasserstrom an, die Manometerrohren zeigen den Druckverlauf längs des Stromkreises an. Nun wird zusätzliches Wasser durch eine der Manometerrohren in den Stromkreis eingefüllt. Dadurch steigt der Wasserspiegel in allen Manometerrohren.

**Ergebnis:** Trotz der Zunahme des Drucks an jeder Stelle des Stromkreises ändert sich am Strömungsverhalten nichts, die Stromstärke und alle Druckdifferenzen zwischen zwei Punkten bleiben gleich.

**Beim Strömen kommt es nicht auf den Druck  $p$ , sondern auf die Druckdifferenz  $\Delta p$  an.**

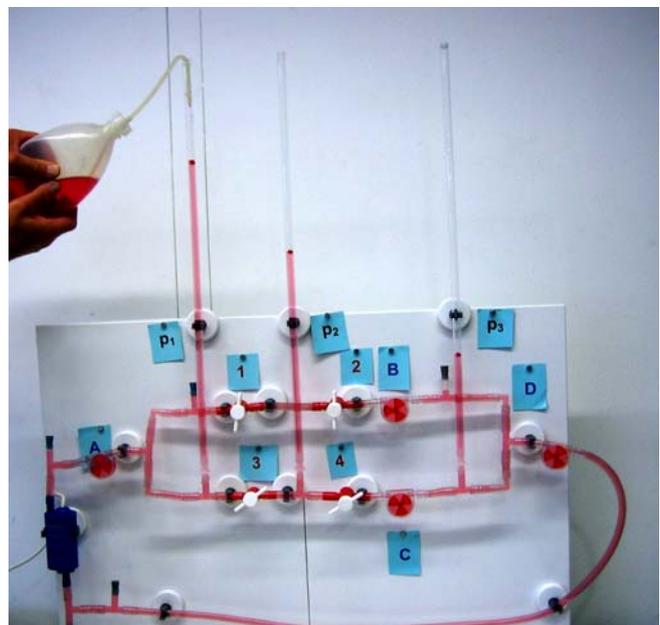


Abb. 11: Der absolute Druck steigt durch das Hinzufügen von Wasser, alle Druckdifferenzen bleiben jedoch gleich.

## 11. Vertikaler Aufbau

Abbildung 12 zeigt, dass der Stromkreis auch vertikal betrieben werden kann, um den Schweredruck des Wassers auszugleichen.

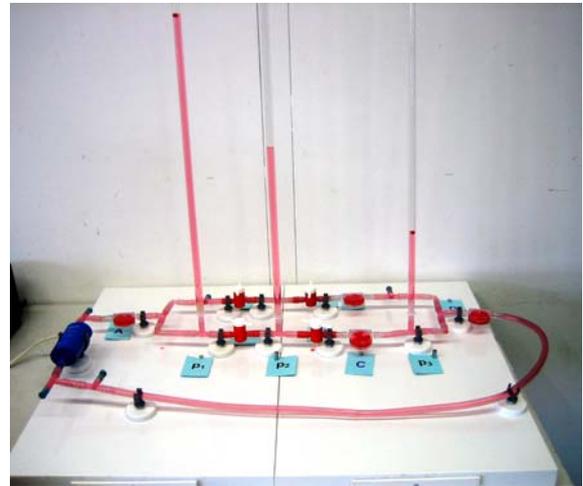


Abb. 12: Wasserstromkreis vertikal betrieben.

## 12. Literatur:

- [1] Plappert, D.: Die Strukturgleichheit verschiedener physikalischer Gebiete gezeigt am Beispiel Hydraulik-Elektrizitätslehre, Hermann Schroedel Verlag Hannover. Dieser Artikel ist zu finden unter [www.plappert-freiburg.de/physik](http://www.plappert-freiburg.de/physik)
- [2] Plappert, D.: Verständliche Elektrizitätslehre, Praxis der Naturwissenschaften Physik 7/52, Oktober 2003
- [3] Anleitungen für qualitative und quantitative Versuche mit dem Wasserstromkreis und den Energie-Träger-Stromkreis Wasserstromkreisen bei Conatex in Vorbereitung.